

Стариков Евгений Владимирович

**ТЕПЛОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
ГИПЕРСНАРЯДНОГО РЕЖИМА ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ В
СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

Специальность: 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2010

Работа выполнена на кафедре «Атомная энергетика» теплоэнергетического факультета ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Щеклеин Сергей Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Прибатурин Николай Алексеевич;

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Никитин Евгений Дмитриевич

Ведущая организация: Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

Защита состоится «25» июня 2010 г. в 15 час. 30 мин. на заседании специализированного совета Д 212.285.07 при ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5 (8-й учебный корпус УГТУ-УПИ), ауд. Т-703.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью Вашего учреждения, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, ученому секретарю университета. Тел.: (343) 375-48-51; факс: (343) 375-94-62; e-mail: lta_ugtu@mail.ru

Автореферат разослан « » мая 2010 г.

Ученый секретарь специализированного совета
Д 212.285.07

К.Э. Аронсон

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие энергетики в условиях интенсивной разработки, эксплуатации и истощения природных ресурсов и загрязнения биосферы земли требует заблаговременно изыскивать новые энергоресурсы и разрабатывать не только эффективные, но и достаточно чистые способы преобразования энергии. Одним из важнейших направлений экономии топливно-энергетических ресурсов наряду с повышением эффективности теплопередающих и теплогенерирующих установок является разработка технологий использования низкопотенциальной энергии техногенного происхождения.

В различных областях современной техники осуществляются движение теплоносителя и тепломассоперенос в условиях парообразования в стесненных условиях. В сравнении с широко распространенными в энергетике, холодильной технике, пищевой и химической технологии процессами парообразования в свободных объемах процессы парообразования в стесненных условиях связаны с тем, что зарождение, развитие и движение элементов паровой фазы в ряде случаев происходят в условиях спонтанного возникновения снарядного режима кипения (минуя фазу пузырькового кипения), когда размер парового снаряда существенно превосходит диаметр канала, – гиперснарядного режима парообразования. Образование паровых снарядов ведет к пульсациям давления паровой среды в канале, снижению теплопередачи, повышению тепловых и динамических нагрузок на оборудование.

Особый интерес представляет изучение упомянутых процессов в связи с созданием новых эффективных теплоотводящих систем на базе термосифонов для солнечных коллекторов, термостатирующих и терморегулирующих устройств для, обеспечения тепловых режимов теплонагруженных элементов энергетики и электронной техники, систем отбора тепла от низкопотенциальных источников.

Целью работы является изучение физических механизмов возникновения, условий и области существования гиперснарядного режима парообразования, влияния данного режима на надежность теплоотвода и возможности его применения для совершения полезной работы.

Задачи исследования

1. Экспериментальное исследование особенностей парообразования и характеристик паровых снарядов в стесненных условиях при отсутствии циркуляции.
2. Разработка физической модели процесса образования паровых снарядов при кипении жидкости в стесненных условиях при отсутствии циркуляции.
3. Экспериментальное исследование теплотехнических характеристик термосифона в условиях возникновения снарядного режима кипения.
4. Реализация практического применения энергии паровых снарядов.
5. Определение коэффициента термомеханического преобразования тепловой энергии в установке с узким вертикальным каналом, работающей на основе эффекта парового снаряда.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается применением апробированных методов для обработки результатов эксперимента и использованием метрологического поверенного оборудования, позволяющего выполнить точные измерения контролируемых параметров, совпадением экспериментальных и расчетных данных, а также их хорошим согласованием на уровне тестовых опытов с данными других авторов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Экспериментально установлена область существования гиперснарядного режима парообразования, который наблюдается наряду с классическими режимами парообразования жидкости, такими как пузырьковый, снарядный, эмульсионный, дисперсно-кольцевой, кольцевой, дисперсный в обогреваемых вертикальных каналах с малым диаметром, в условиях отсутствия циркуляции.
2. Экспериментально определено влияние ряда параметров на возникновение гиперснарядного режима парообразования, таких как диаметр обогреваемого канала, плотность подводимого теплового потока и содержание поверхностно-активных веществ в рабочей среде.
3. Разработана физическая модель, описывающая процесс образования паровых снарядов при кипении жидкости в каналах малого диаметра в условиях отсутствия циркуляции.
4. Экспериментально исследованы характеристики паровых снарядов, образующихся в обогреваемых узких вертикальных каналах, и разработана методика расчета КПД термомеханической установки с узким вертикальным каналом.
5. Показана возможность термомеханического преобразования солнечной энергии с помощью установки, работающей на основе эффекта парового снаряда.

Практическая ценность работы заключается в том, что:

1. Выявлены факторы, способствующие повышению нежелательных динамических нагрузок в энергетическом оборудовании и снижению теплопередачи.
2. Предложенная методика оценки эффективности использования гиперснарядного режима парообразования в термомеханической установке с узким вертикальным каналом применима в малой энергетике с целью использования энергии паровых снарядов в энергооборудовании.
3. На основе полученных результатов работы даны практические рекомендации по конструктивному оформлению для повышения эффективности работы термосифонных теплообменных аппаратов.
4. Материалы исследования использованы при разработке курса «Основное энергетическое и вспомогательное оборудование установок НиВИЭ» и лабораторных работ для подготовки студентов УГТУ-УПИ.
5. Результаты работы приняты к использованию (внедрению) на следующих предприятиях: ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», ООО «Энергосервисная компания», ООО Производственная коммерческая фирма «Компания «Энергоснаб».

Вопросы, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментальных исследований особенностей парообразования и характеристик паровых снарядов в обогреваемых узких вертикальных каналах при отсутствии циркуляции
2. Физическая модель, описывающая процесс образования паровых снарядов при кипении жидкости в стесненных условиях, позволяющая выявить факторы, повышающие эффективность термомеханического преобразования.
3. Результаты экспериментального исследования характеристик теплопередающей способности термосифона в условиях возникновения снарядного режима кипения.
4. Методика расчета термомеханического КПД установки с узким вертикальным каналом.
5. Результаты исследований практического применения энергии паровых снарядов, образующихся в обогреваемых вертикальных каналах малого диаметра.

Личный вклад автора заключается в том, что им на основе опубликованных данных поставлены задачи исследования, разработаны основные методики проведения экспериментов, созданы и отлажены экспериментальные установки, проведены опыты, обработаны и проанализированы полученные данные, на основе которых найдена область существования гиперснарядного режима, разработана методика расчета эффективности работы термомеханической установки с узким вертикальным каналом, построена физическая модель, описывающая процесс образования паровых снарядов при кипении жидкости в каналах с малым диаметром.

Апробация работы. Материалы диссертации были представлены на 3 международных, 9 всероссийских и 6 региональных конференциях: Всероссийской научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2004 г.), V Всероссийском совещании-выставке по энергосбережению «Энергосбережение: состояние и перспективы» (Екатеринбург, 2004 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2005 г.), Международном научном молодежном симпозиуме «Безопасность биосферы 2005» (Екатеринбург, 2005 г.), VII отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ (Екатеринбург, 2005 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2006 г.), VII Всероссийском совещании-выставке по энергосбережению «Энергосбережение: состояние и перспективы» (Екатеринбург, 2006 г.), X отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ (Екатеринбург, 2006 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные энергетические технологии. Экология. Экономика, безопасность и подготовка кадров» (Екатеринбург, 2006 г.), XI отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ (Екатеринбург, 2006 г.), Всероссийской научно-практической конференции

«Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2007 г.), Международной научно-практической конференции «Ecotechnologies of XXI century» (Екатеринбург, 2007 г.), XII отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ (Екатеринбург, 2007 г.), XIII отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ (Екатеринбург, 2007 г.), XIV отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ (Екатеринбург, 2008 г.), XV Уральской международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники (Екатеринбург, 2008 г.), VIII Всероссийской научно-практической конференции «Экологические проблемы промышленных регионов» (Екатеринбург, 2008 г.), II Всероссийской научно-технической конференции «Безопасность критических инфраструктур и территорий» (Екатеринбург, 2008 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 8 различных изданиях, из них 2 относятся к изданиям, рекомендуемым ВАК для опубликования результатов кандидатских диссертаций, получено 6 патентов РФ на полезные модели.

Структура и объем работы. Структура диссертации подчинена замыслу исследования и состоит из введения, четырех глав, заключения, шести приложений, списка литературы, включающего 135 наименований. Диссертация изложена на 137 страницах машинописного текста и содержит 58 рисунков и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены основные защищаемые положения.

В первой главе приведен аналитический обзор литературных источников, посвященных исследованию процессов перегрева жидкости, механизму образования парового снаряда в стесненных условиях без принудительной циркуляции, а также работе образования парового снаряда; рассмотрено влияние поверхностного натяжения на перегрев жидкости, приведено практическое применение эффекта парового снаряда в обогреваемых узких каналах. В этой же главе описаны общие характеристики двухфазных термосифонов. На основе критического анализа литературных данных сформулированы задачи работы.

Во второй главе приводится описание методики исследования характеристик паровых снарядов, образующихся в стесненных условиях, проводится моделирование характеристик образования паровых снарядов при кипении жидкости в каналах с малым диаметром, а также обобщаются полученные результаты экспериментов, касающиеся областей существования различных режимов кипения жидкости в стесненных условиях.

Для исследования режимов кипения в стесненных условиях, а также для определения эффективности термомеханического преобразования и выбора

теплоносителя, отвечающего максимальным значениям импульсов давления внутри вертикальных каналов, изготовлена экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1.

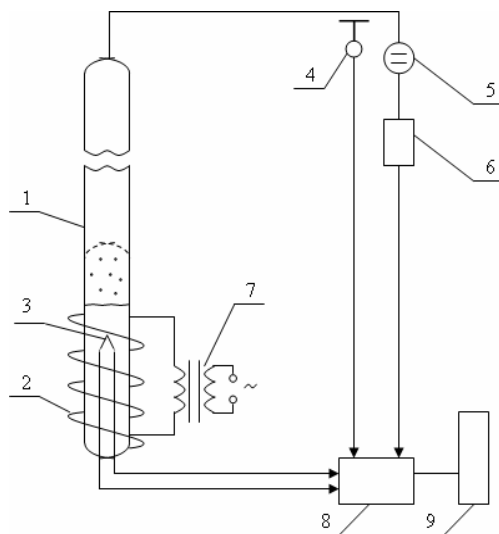


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 – стеклянная трубка; 2 – электронагреватель; 3 – микротермопара; 4 – датчик давления; 5 – электрический преобразователь; 6 – согласующее устройство; 7 – автотрансформатор; 8 – АЦП; 9 – ПЭВМ

Для моделирования процесса кипения с образованием паровых снарядов проведены серии экспериментов в лабораторных условиях. Стеклянные трубки 1 длиной 1,0...1,5 м и диаметром 4, 7, 12,7, 16, 24, 30 мм заполнялись жидкостью на высоту 100-150 мм и нагревались внешним электронагревателем 2 до состояния кипения. Температура жидкости и её перегрев относительно состояния насыщения фиксировались термопарой 3, помещенной в центр столба жидкости, сигнал от которой подавался на аналого-цифровой преобразователь. Верхний конец трубки соединялся резиновой трубкой с малоинерционным датчиком давления CDB-4-100-RS 485 4. Все данные измерений выводились на ПЭВМ 9 и обрабатывались по специально разработанной методике.

В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода с целью уменьшения количества центров парообразования и её смесь с ПАВ (глицерином). Кипение растворов, содержащих компоненты с различными теплофизическими свойствами, характеризуется изменением характеристик парообразования по сравнению с чистыми жидкостями, что отражается на размерах и периодичности образования паровых снарядов в каналах.

В ходе экспериментов выявлялась зависимость импульсов давления внутри канала от ряда параметров: плотности подводимого теплового потока, процентного содержания глицерина в дистиллированной воде, внутреннего диаметра канала.

При изменении плотности теплового потока к каналу в диапазоне от 0 до 27 кВт/м² установлено, что максимальное количество импульсов

давления за единицу времени, имеющих наибольшую амплитуду, наблюдается при плотности теплового потока q , равного 13 кВт/м^2 . Стоит отметить, что при плотности теплового потока менее 7 кВт/м^2 процесс парообразования прекращается. Это связано с тем, что рабочая жидкость не нагревается до температуры кипения из-за тепловых потерь, которые соизмеримы с данной величиной подводимого теплового потока. При плотности теплового потока более 27 кВт/м^2 наблюдается кипение в объеме внутри вертикального канала без образования паровых снарядов. Характер изменения давления в канале приведен на рис. 2.

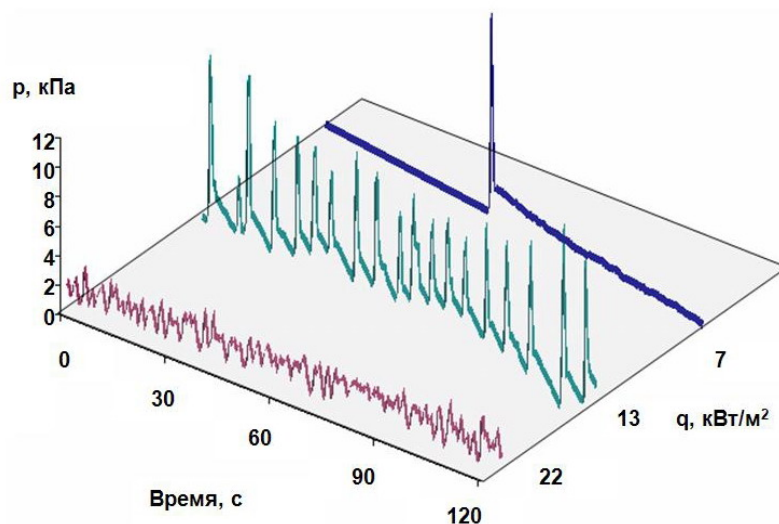


Рис. 2. Изменение давления в канале диаметром 12,7 мм при образовании и разрушении паровых снарядов для раствора глицерина с содержанием глицерина 0,8 % (об.) в зависимости от плотности теплового потока: $q = 7 \text{ кВт/м}^2$ (режим импульсного кипения); $q = 13 \text{ кВт/м}^2$ (режим периодического кипения); $q = 22 \text{ кВт/м}^2$ (режим пузырькового кипения)

Результаты наблюдений качественно согласуются с данными Хьюитта Дж., Холл-Тэйлора за исключением существования гиперснарядного режима кипения, и подтверждают влияние теплового потока на режим кипения жидкости в относительно узких вертикальных каналах.

При добавлении глицерина в дистиллированную воду объемное содержание глицерина в воде варьировалось от 0 до 100 %. В результате экспериментов было установлено, что для растворов глицерина с концентрацией в диапазоне от 0,8 до 15 % импульсы давления имеют значительно большую амплитуду, чем в случае использования воды в качестве рабочей жидкости. Оптимальная же концентрация глицерина в воде для образования как можно большего количества импульсов давления в канале с максимальной амплитудой составляет 0,8 %. При уровне содержания глицерина в воде 0 %, а также в диапазоне от 20 до 100 % наблюдается кипение в объеме внутри канала без образования паровых снарядов.

Характер изменения давления в канале от концентрации ПАВ виден из серии графиков, приведенных на рис. 3.

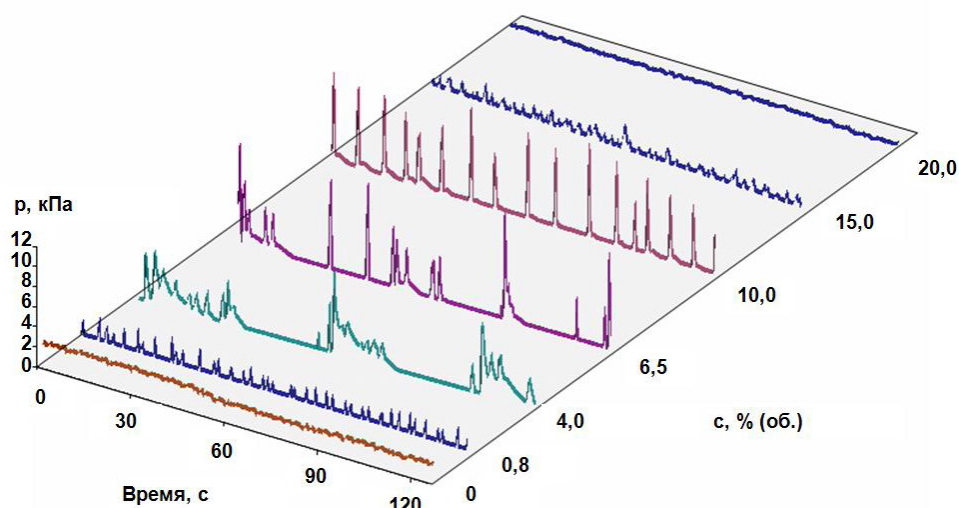


Рис. 3. Изменение давления в канале диаметром 16 мм при образовании и разрушении паровых снарядов для раствора глицерина, при плотности теплового потока 13 кВт/м^2 в зависимости от концентрации глицерина в воде

В ходе экспериментов были испытаны каналы с внутренним диаметром начиная от 4 и заканчивая 30 мм при одинаковых концентрациях глицерина в воде и постоянной величине подводимого теплового потока. Анализ полученных результатов показал, что имеется четкая зависимость между образующимися импульсами давления внутри вертикального канала и диаметром самого канала: чем больше внутренний диаметр канала, тем чаще импульсы давления и тем меньше их амплитуда. Однако, приближаясь к каналу с внутренним диаметром 24 мм, наблюдается увеличение периода между импульсами давления без изменения их амплитуды, а при диаметре 30 мм уже прекращение возникновения импульсов давления и возникновения объемного кипения внутри канала. При внутреннем диаметре канала 4 мм паровой пузырь не может всплыть на поверхность рабочей жидкости, что делает невозможным изменение давления внутри канала. Зависимость образования импульсов давления внутри канала от внутреннего диаметра канала показана на рис. 4.

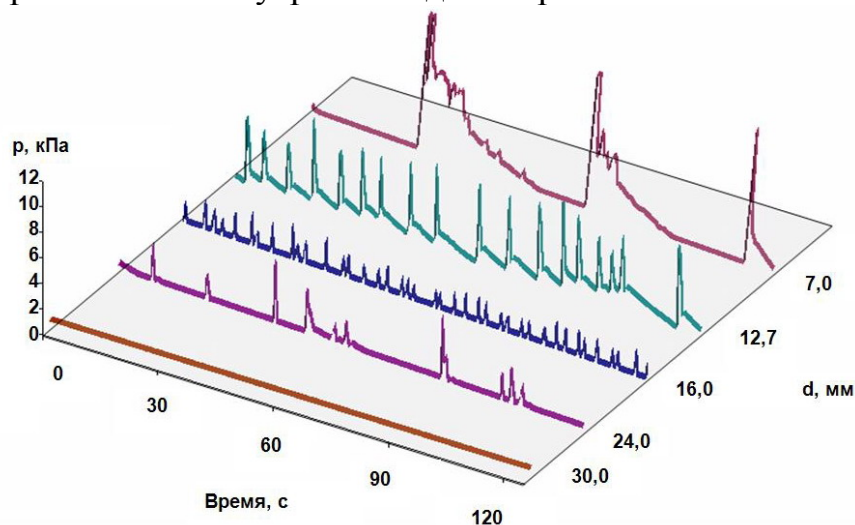


Рис. 4. Изменение давления в канале при образовании и разрушении паровых снарядов для раствора глицерина с содержанием глицерина 0,8 % (об.) и тепловом потоке 13 кВт/м^2 в зависимости от внутреннего диаметра канала

Обобщение полученных результатов экспериментов, касающихся областей существования различных режимов парообразования в узких вертикальных каналах, представлено на рис. 5.

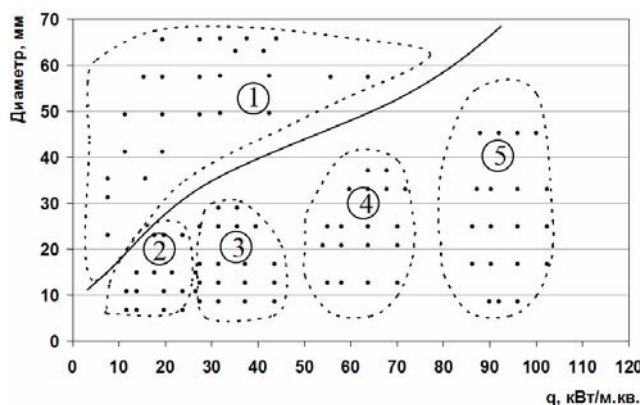


Рис. 5. Режимы парообразования раствора глицерина с содержанием глицерина 0,8 % (об.) в узких вертикальных каналах в зависимости от диаметра канала и плотности подводимого теплового потока: 1 — пузырьковый режим; 2 — гиперснарядный режим; 3 — снарядный режим; 4 — эмульсионный режим; 5 — дисперсно-кольцевой режим

Таким образом, область существования гиперснарядного режима парообразования, обнаруженного в ходе экспериментальных исследований, сопровождающегося большим импульсом давления и наличием всего лишь одного парового пузыря в канале, длина которого намного больше внутреннего диаметра канала, находится в относительно узком диапазоне параметров: плотности подводимого теплового потока к каналу (от 7 до 27 кВт/м²), процентного содержания ПАВ (глицерина) в дистиллированной воде (от 0,8 до 10 %), внутреннего диаметра канала (от 7 до 24 мм).

Закономерности роста парового пузыря внутри трубы представляют большой интерес, в частности, в связи с необходимостью определения расхода жидкости, вскипающей в узком канале, перекрытом в некотором сечении отсечным клапаном (либо просто закупоренном по какой-либо причине) и соединенном на выходе с приемником рабочего тела.

Условием моделирования является наличие неконденсирующегося газа (воздуха) над поверхностью кипящей жидкости в зоне испарения. Характерной особенностью процесса является наличие четкой границы между слоем выталкиваемой жидкости и воздухом, которая перемещается по мере расширения парового пузыря, что заставляет газ сжиматься в верхней части канала вплоть до момента разрушения пузыря. Последующая конденсация пара на стенке канала сопровождается переохлаждением конденсата, который стекает в испаритель, где снова нагревается вместе с оставшейся после испарения жидкостью до следующего момента парообразования. Указанные условия ведут к возникновению автоколебательного процесса с интенсивностью, определяемой свойствами кипящей жидкости, конструктивными и режимными параметрами процесса.

Подобные автоколебания не могут возникать при кипении и конденсации пара в каналах с большими поперечными размерами, где образуется множество

мелких пузырьков, создающих хаотические колебания основных параметров парообразующей системы.

В рассматриваемой модели предполагается:

1. канал представляет собой замкнутую систему, заполненную воздухом в верхней части канала и жидкостью в нижней части канала;

2. высота слоя жидкости $l_{жс}$ соответствует длине обогреваемого участка канала и составляет незначительную часть общей длины канала, т.е. $l_{жс}/L_k \ll 1$;

3. отношение внутреннего диаметра канала к длине обогреваемого участка $d_k/L_{исп} \ll 1$;

4. сжатие воздуха в канале в результате расширения парового пузыря рассматривается как почти изотермический процесс.

На рис. 6 приведена схема рассматриваемой модели.

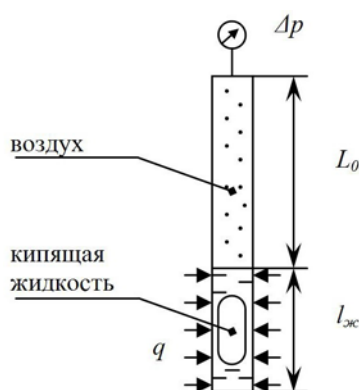


Рис. 6. Схема модели образования парового снаряда при гиперснарядном режиме парообразования

Согласно приведенной схеме импульс давления Δp от сжатия воздуха в верхней части канала, связанный с образованием и ростом парового пузыря, можно рассчитать по уравнению:

$$\Delta p = p_0 \cdot \frac{V_{\Pi}}{V_0} \left(1 - \frac{V_{\Pi}}{V_0} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где p_0 , V_0 и V_{Π} – атмосферное давление, объем воздуха в канале над слоем жидкости и объем парового пузыря соответственно.

Полагая, что в начале роста парового пузыря $V_{\Pi}/V_0 \ll 1$, можно записать импульс давления в виде:

$$\Delta p \approx p_0 \cdot \frac{V_{\Pi}}{V_0} \quad (2)$$

или в виде:

$$\Delta p = \frac{4p_0}{\pi d_k^2} L_0^{-1} \cdot V_{\Pi}, \quad (3)$$

где d_k – внутренний диаметр канала, L_0 – длина части канала, заполненной воздухом.

Для определения объема парового пузыря запишем уравнение теплового баланса для процесса его роста:

$$r \cdot \rho_{\Pi} \frac{dV_{\Pi}}{d\tau} = Q_{\Pi}, \quad (4)$$

где r – теплота парообразования, Дж/кг; ρ_{Π} – плотность насыщенного пара, кг/м³; Q_{Π} – теплота, подводимая к растущему пузырю, Вт.

Объем пузыря V_{Π} в канале за конечное время его роста τ_0 в кипящей жидкости определяется количеством подведенной теплоты:

$$V_{\Pi} = \int_0^{\tau_0} \frac{Q_{\Pi}}{r \cdot \rho_{\Pi}} d\tau = \frac{\pi d_K \cdot l_{жс} \cdot q \cdot \tau_0}{r \cdot \rho_{\Pi}}. \quad (5)$$

При этом предполагается, что все подведенное тепло к жидкости за период времени τ_0 идет на увеличение объема одиночного пузыря V_{Π} :

$$Q_{\Pi} = q_{\Pi} \cdot F_{\Pi} = q \cdot F_K \quad (6)$$

где q_{Π} и F_{Π} – плотность подводимого теплового потока к пузырю, кВт/м², и площадь поверхности парового пузыря, м², q и F_K – плотность подводимого теплового потока к каналу, кВт/м², и площадь боковой поверхности канала, м².

Таким образом, значение импульса давления в канале можно выразить через основные параметры, определяющие процесс парообразования в канале диаметром d_K :

$$\Delta p = \left(\frac{4 p_0}{r \rho_{\Pi}} \right) \cdot \left(\frac{l_{жс}}{d_K} \right) \cdot L_0^{-1} \cdot q \cdot \tau_0 \quad (7)$$

Продолжительность роста пузырей τ_0 от момента их образования до момента всплытия определяется помимо теплофизических параметров кипящей жидкости подводимой плотностью теплового потока. Полагая, что τ_0 непосредственно связана с числом активных центров парообразования, продолжительность роста отдельного пузыря в канале, как при кипении воды, так и при кипении водоглицеринового раствора можно представить в виде:

$$\tau_0 = const \cdot f(c\%) \cdot q^n. \quad (8)$$

Как показал анализ осциллограмм импульсов давления при кипении воды (дистиллята) значение τ_0 можно представить уравнением:

$$\tau_0 = a_1 \cdot q^{-2}, \quad (9)$$

где $a_1 = 4,76 \cdot 10^6$, с·Вт²·м⁻⁴ – размерный коэффициент пропорциональности.

В случае кипения водоглицеринового раствора параметр τ_0 зависит как от концентрации ПАВ $c\%$ и диаметра канала d_K , так и плотности подводимого теплового потока:

$$\tau_0 = a_2 \cdot q^{-1,6} \left(1 + \sqrt{c\%} \right)^1 \cdot \exp \left[-2,7 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{l_{жс}}{d_K} \right)^2 \cdot c\% \right], \quad (10)$$

где $c\%$ – концентрация глицерина в воде, об. %;

$a_2 = 0,36 \cdot 10^6$, $\text{с} \cdot \text{Вт}^{1,6} \cdot \text{м}^{-3,2}$ – размерный коэффициент пропорциональности.

На рис. 7 приводится сопоставление результатов расчетов по уравнению (7) с использованием зависимостей (9) и (10) с экспериментальными данными импульсов давления в виде среднеквадратичных значений $\sqrt{\Delta p^2}$ как для условий парообразования воды, так и водоглицериновых растворов с концентрацией от 0,8 до 10 % в каналах диаметром 7, 12,7, 16 и 24 мм. Среднеквадратичная погрешность аппроксимации экспериментальных значений с помощью предложенных уравнений не превышает 32%, что является приемлемым для такого случайного процесса, как гиперснрядное парообразование в каналах.

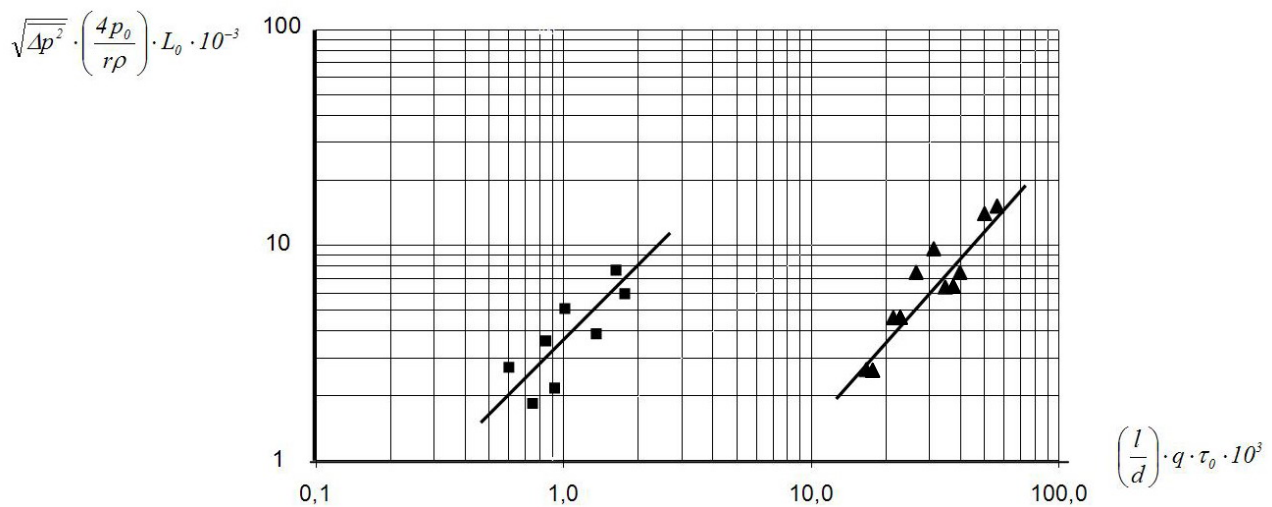


Рис. 7. Сравнение экспериментальных значений импульсов давления $\sqrt{\Delta p^2}$ с расчетными значениями по формулам (2.7), (2.9), (2.10): ■ – вода; ▲ – водоглицериновый раствор

Генерация импульсов давления в канале в виде автоколебательного процесса характеризуется продолжительностью или периодом их повторения τ , значительно большим, чем продолжительность образования и всплытия парового пузыря τ_0 в канале. Периодичность импульсов давления включает время нагрева τ_n переохлажденной жидкости после конденсации пара в пузыре, продолжительность перегрева жидкости относительно температуры насыщения $\tau_{пер}$ и собственно продолжительность образования и роста пузыря τ_0 . На основании экспериментальных значений $\sqrt{\Delta p^2}$ (кПа) для различных условий кипения предложена формула (11), отражающая свойства автоколебательного процесса как при кипении воды, так и водоглицериновых смесей в каналах с внутренним диаметром от 7 до 24 мм:

$$\tau = \tau_n + \tau_{пер} + \tau_0 = b \cdot \left(\sqrt{\Delta p^2} \right)^{1,45}, \quad (11)$$

$b = 2,46 \cdot 10^{-5}$, $\text{с} \cdot \text{Н}^{-1,45} \cdot \text{м}^{2,9}$ – размерный коэффициент пропорциональности.

Полученные эмпирические соотношения для τ_0 и τ содержат размерные коэффициенты a_1 , a_2 и b , что ограничивает их использование диапазоном варьируемых в экспериментах параметров: $0,1 \leq c \leq 10\%$, $7 \leq d \leq 24$ мм, $7 \leq q \leq 25$ кВт/м², $100 \leq l_{жс} \leq 150$ мм.

Тем не менее, используя формулы (7), (9), (10), (11) можно путем предварительных расчетов выбрать оптимальные теплофизические и конструкционные параметры установки термомеханического преобразования теплоты, отвечающих максимальным КПД преобразователя. Также полученные соотношения будут полезны при расчетах режимов работы теплообменных аппаратов для снижения тепловых и динамических нагрузок в энергетическом оборудовании.

В третьей главе приводится описание опытной установки двухфазного термосифона (ТС), описываются методики и анализируются результаты теплотехнических исследований ТС в лабораторных условиях в зависимости от ряда параметров: объема заполнения ТС, плотности подводимого теплового потока, угла наклона ТС.

В термосифонах возникновение снарядного режима парообразования ведет к нежелательным пульсациям давления паровой среды в канале и для их уменьшения применяют специальные мероприятия.

С целью определения влияния гиперснарядного режима кипения теплоносителя термосифона на его теплопередающую способность была исследована работа термосифонного теплообменника.

В целях удобства экспериментальные исследования проводились с единичным термосифонным элементом при тепловых нагрузках 7 до 27 кВт/м² с целью возникновения снарядного режима кипения теплоносителя в термосифоне. Параметры, характеризующие конструкцию ТС приведены в таблице 1.

Таблица 1

Конструктивные особенности термосифонного элемента

№	Наименование параметров	Норма
1	Габаритные размеры	1500 x 15 x 15 мм
2	Вес (сухой)	3,5 кг
3	Длина охлаждающего участка	375 мм
4	Длина тягового участка	625 мм
5	Длина испарительного участка	500 мм
6	Внутренний диаметр	12,7 мм
7	Внутренний объем	0,19 л
8	Материал	медь
9	Теплоноситель	вода/этиловый спирт
10	Охладитель	вода
11	Соединения вход/ выход	резьба 3/4", внутренняя

Для создания в рабочем объеме термосифона заданного разряжения (в холодном состоянии), а также с целью удаления растворенных в жидкости газов (деаэрации), вытеснения газовых фракций парами жидкости использовался метод длительного нагрева (термическая деаэрация) жидкости. Принципиальная схема стенда для проведения теплотехнических испытаний термосифона приведена на рис. 8.

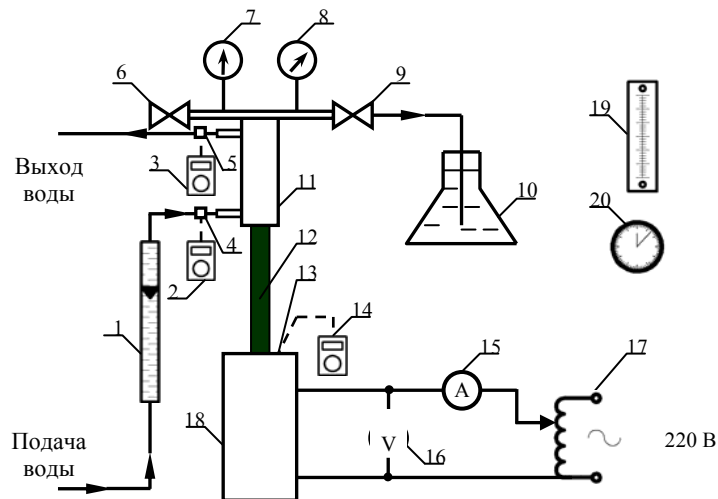


Рис. 8. Принципиальная схема стенда для проведения теплотехнических испытаний термосифона: 1 – ротаметр; 2, 3, 14 – электронные мультиметры Mastech MAS-345; 4, 5, 13 – термопары; 6, 9 – запорные вентили; 7 – манометр; 8 – вакуумметр; 10 – колба с водой; 11 – водяной теплообменник-охладитель зоны конденсации; 12 – термосифон; 15 – амперметр; 16 – вольтметр; 17 – автотрансформатор; 18 – жидкостный термостат с электрическим нагревательным элементом; 19 – ртутный термометр; 20 – секундомер; 21 – регулирующий вентиль

По результатам измерений рассчитывался тепловой поток, отведенный охлаждающей водой от термосифона по формуле:

$$Q = \rho \cdot C_p \cdot G \cdot (t' - t''), \text{ Вт / м}^2; \quad (12)$$

где G – расход воды в м³/с;

C_p – удельная теплоемкость воды, кДж/кг·гр;

ρ – плотность воды, кг/м³;

t' – температура воды на выходе теплообменника-охладителя, °С;

t'' – температура воды на входе теплообменника-охладителя, °С;

Тепловой поток, переданный рабочей жидкостью термостата (глицерину) от электрического нагревателя, определялся по формуле:

$$P_{\text{ex}} = U \cdot I, \text{ Вт / м}^2; \quad (13)$$

где U – напряжение, подводимое к нагревательному элементу, В;

I – сила тока, А.

Эффективность работы термосифона в виде теплопередающей способности, определялась по формуле:

$$\kappa = Q/P_{\text{ex}} \quad (14)$$

Среднеквадратичная относительная погрешность теплопередающей способности термосифона рассчитывалась как максимальная инструментальная погрешность и составила 5 %.

С целью определения оптимальных тепловых нагрузок и объема заполнения вертикального термосифона были проведены экспериментальные исследования теплопередающей способности термосифона в зависимости от объема заполнения и плотности подводимого теплового потока. В ходе исследований объем заполнения термосифона изменялся от 7 до 60 %, а плотность подводимого теплового потока к испарительной части термосифона варьировалась в пределах 7–27 кВт/м².

Результаты исследований в виде зависимости теплопередающей способности термосифона от плотности подводимого теплового потока представлены на рис. 9 для различных объемов заполнения термосифона (рабочая жидкость – вода).

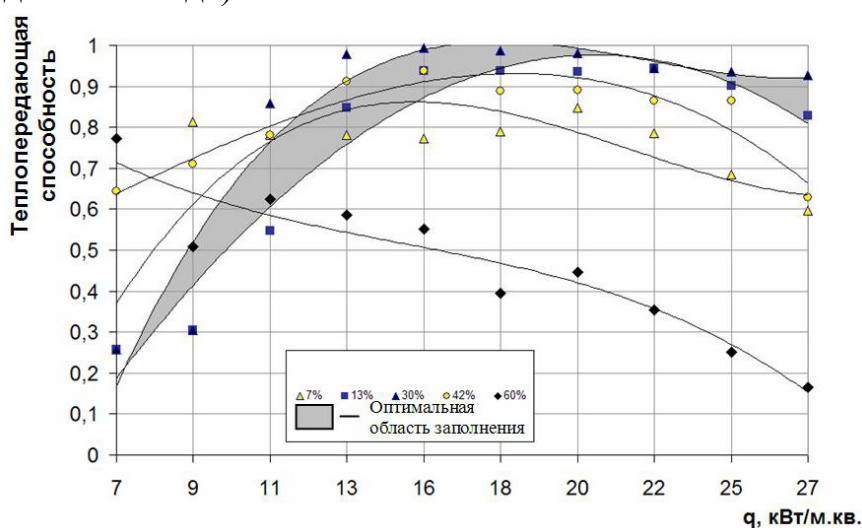


Рис. 9. Зависимость теплопередающей способности термосифона с водным теплоносителем от плотности подводимого теплового потока

В ходе испытаний получены результаты, показывающие, что максимальные значения теплопередающей способности ТС достигаются при плотности подводимого теплового потока 16–25 кВт/м² и степени заполнения рабочей жидкостью 10–30%, что совпадает с данными в зонах параметров и свойств теплоносителей, полученными в работах таких авторов, как Кутателадзе С.С., Майданик Ю.Ф., Пиоро И.Л., Антоненко В.А., Пиоро Л.С., Дан П., Рей Д., Петухов Б.С., Толубинский В.И., Мильман О.О., Дорошук В.Е., Бараненко В.И., Белойван А.И., Колоскова Н.Ю., Вишняк Е.Г., Бодрых В.В., Ермаков Г.В., Фисенко В.В., Белов Л.А., Чикань Л.А., Корневский В.А. Однако при плотности подводимого теплового потока менее 16 кВт/м², когда существует развитый гиперснрядный режим кипения теплоносителя, теплопередающая способность ТС резко снижается.

Обобщение всего массива экспериментальных данных позволило получить бипараметрическую диаграмму теплопередающей способности ТС при варьировании плотности подводимого теплового потока и уровня заполнения объема канала рабочей жидкостью (рис. 10).

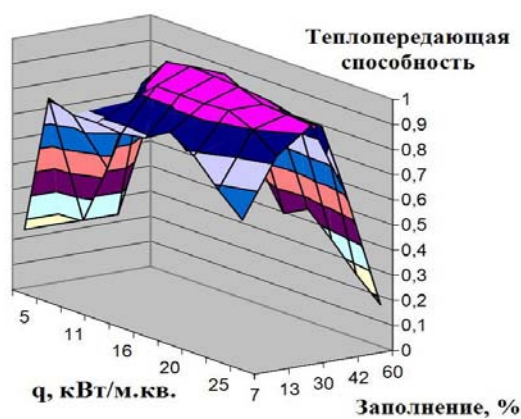


Рис. 10. Зависимость теплопередающей способности ТС от уровня заполнения и плотности подводимого теплового потока

Анализ диаграммы показывает наличие устойчивой зоны максимальных значений теплопередающей способности при уровнях заполнения термосифона рабочей жидкостью в диапазоне 10–30%; позволяет выявить плотность теплового потока, соответствующего переходу системы в двухфазный режим и резкому росту теплопередающей способности.

При рассмотрении работы термосифона в реальных условиях эксплуатации, особенно в передвижных устройствах, могут иметь место те или иные отклонения трубы от вертикального положения. Важно поэтому знать, какое влияние окажет наклон ТС на его теплопередающие свойства. В предельном случае, когда участок нагрева окажется выше зоны охлаждения, термосифон функционировать не будет.

С целью определения оптимальных углов наклона термосифона с оптимальным заполнением были проведены экспериментальные исследования теплопередающей способности термосифона в зависимости от угла наклона. В ходе исследований угол наклона термосифона к горизонтальной плоскости изменялся от 90 до 30 градусов.

Характер зависимости теплопередающей способности термосифона от плотности подводимого теплового потока для разных углов наклона ТС к горизонтальной плоскости представлен на рис. 11.

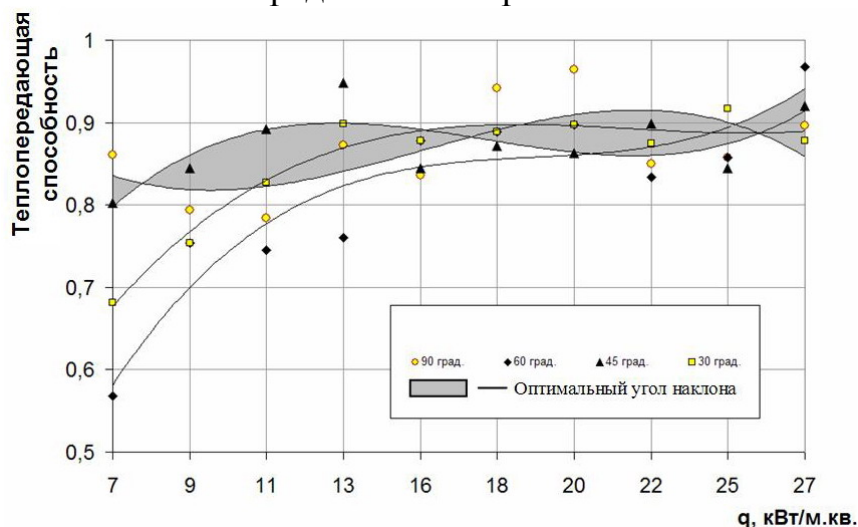


Рис. 11. Зависимость теплопередающей способности термосифона от угла наклона

Исследования зависимости теплопередающей способности термосифона от угла наклона показали, что наибольшая теплопередающая способность ТС наблюдается при угле наклона 90 градусов (вертикальное положение) – 0,964, при плотности теплового потока 20 кВт/м². При уменьшении угла несколько снижается значение максимальной теплопередающей способности, но увеличивается интервал плотности теплового потока, при котором будет достаточно устойчивый режим работы. Как показали испытания, при угле наклона 30 градусов имеется устойчивый режим работы (теплопередающая способность ТС колеблется в интервале от 0,817 до 0,916) в интервале плотности теплового потока от 13 до 27 кВт/м².

В четвертой главе описывается использование установки с термомеханическим преобразованием в качестве автономного накопителя энергии, применение термосифона в режиме нагрева воды, генерации пара и перекачивания воды с использованием солнечной энергии, описывается методика расчета термомеханического КПД установки с узким вертикальным каналом.

Преобразование энергии импульсов давления от паровых снарядов в энергию электрических колебаний возможно с помощью электрических устройств на основе электретных приборов, в которых генерирование электрических сигналов осуществляется вследствие деформации диафрагмы под воздействием внешнего давления. Вырабатываемый электрический сигнал подобных преобразователей может достигать амплитудных значений 10–20 В в зависимости от свойств и конструкции преобразователя.

В ходе экспериментов подключенный к верхнему концу обогреваемого вертикального канала преобразователь создавал разнополярные импульсы напряжения 10–12 В. В качестве электронакопительного устройства служил ионистор емкостью 1 Ф, подключаемый через согласующий трансформатор и выпрямитель. Схема автономного накопителя энергии с использованием термомеханического преобразования приведена на рис. 12.

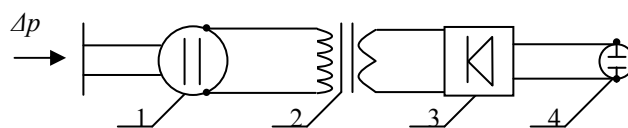


Рис. 12. Схема автономного накопителя энергии с использованием термомеханического преобразования: 1 – электретный преобразователь; 2 – согласующий трансформатор; 3 – выпрямитель; 4 – заряжаемый ионистор

В качестве примера на рис. 13 приведены значения изменения давления пароводяной смеси в канале и соответствующее изменение напряжения на выходе электретного преобразователя в режиме холостого хода, свидетельствующих о согласованности протекающих процессов термомеханического преобразования.

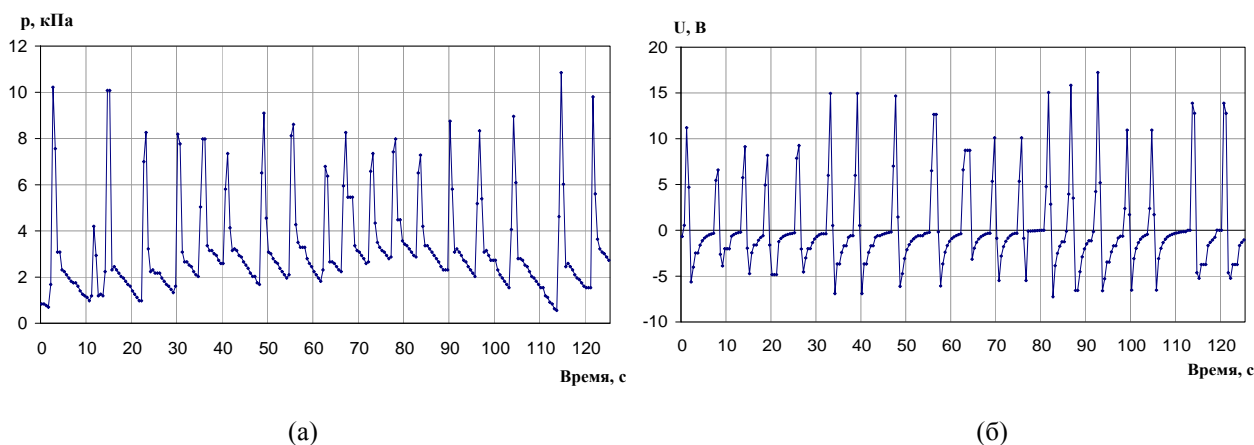


Рис. 13. Изменение давления в канале диаметром 12,7 мм (а) и соответствующее изменение напряжения на электретном преобразователе (б) при образовании и разрушении паровых снарядов для раствора глицерина с содержанием глицерина 0,8 % (об.) при плотности теплового потока $q=22 \text{ кВт/м}^2$

Скорость зарядки ионистора составляла $10^{-2} - 2 \cdot 10^{-2} \text{ мВ/с}$ и зависела от амплитуды и частоты импульсов давления в трубке. Для иллюстрации работы автономного накопителя энергии на рис. 14 приведен отдельный участок процесса зарядки, характеризующий процесс изменения напряжения на ионисторе.

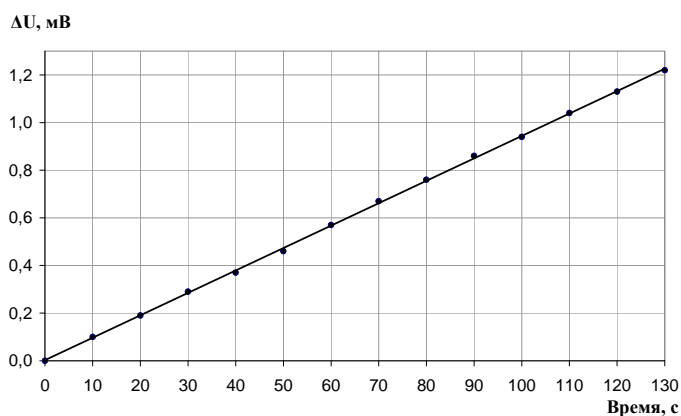


Рис. 14. Изменение напряжения на ионисторе в процессе его зарядки (раствор глицерина 0,8 % об. и $q=22 \text{ кВт/м}^2$)

При функционировании установки с подобным устройством можно получить за сутки запас энергии $2 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$ при зарядном напряжении $0,86 - 1,6 \text{ В}$, что открывает перспективы использования вторичных низкопотенциальных источников теплоты для питания автономных накопителей энергии для слаботочных потребителей.

Примером преобразования энергии паровых снарядов, образующихся в узких каналах, в механическую энергию может служить установка «Термомеханический насос», предназначенная для перекачивания воды с использованием солнечной энергии в качестве источника тепла. Принципиальная схема гелиоустановки приведена на рис. 15.

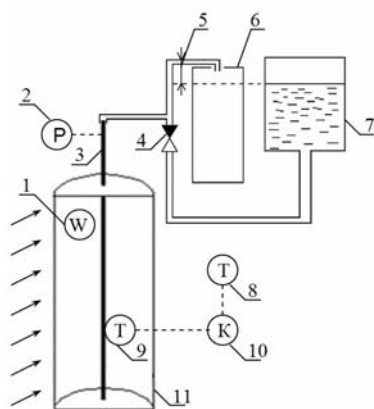


Рис. 15. Принципиальная схема «Термомеханического насоса»: 1 – радиометр; 2 – датчик давления; 3 – термосифон; 4 – обратный клапан; 5 – высота заправки воды; 6 – мерная колба; 7 – бак с водой (подпитка); 8, 9 – термодатчики; 10 – аналого-цифровой преобразователь, соединенный с компьютером; 11 – солнечный концентратор

Испытания гелиоустановки проводились в поселке Растущий в окрестностях Екатеринбурга при средней величине поступающей солнечной радиации на поверхность земли за период испытаний 500 Вт/м^2 . Солнечный концентратор параболоцилиндрического типа устанавливался таким образом, чтобы плоскость его входящей апертуры была расположена перпендикулярно направлению солнечного излучения.

В качестве примера работы термосифона совместно с концентратором солнечной энергии в режиме перекачивания воды приведен график зависимости количества перекаченной воды от времени за один из дней испытаний (рис. 16).

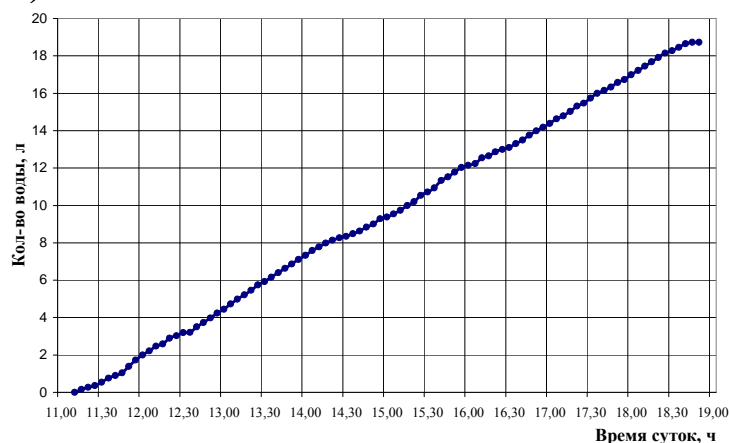


Рис. 16. Зависимость количества перекаченной жидкости от времени (01.08.2007 г.)

Как видно из рис. 16, количество перекаченной воды составило 19 л при средней производительности установки $2,4 \text{ л/ч}$. Средняя интенсивность солнечной радиации за этот период составляла около 500 Вт/м кв .

В ходе эксперимента определялась мощность солнечного излучения, поступающего на приемную поверхность концентратора, по формуле:

$$N_I = E \cdot S, \quad (15)$$

где E – удельная мощность солнечного излучения, поступающая на 1 м^2 поверхности концентратора, Вт/м^2 ; S – площадь входного окна солнечного концентратора, м^2 .

Также в ходе эксперимента определялась мощность, затраченная на перекачку воды по формуле:

$$N_2 = \frac{mgH}{t}, \quad (16)$$

где H – высота закачки воды, м; m – масса перекачанной воды, кг; t – время, затраченное на перекачку, ч.

В ходе выполнения работы была разработана методика расчета термомеханического КПД установки с узким вертикальным каналом, заключающаяся в следующем: для определения количественных характеристик протекающего процесса в канале, использовалось выражение для мощности, выделяемой при образовании последовательных импульсов давления, продолжительностью τ_0 :

$$N = (2\Delta m \cdot \tau)^{-1} \left(\int_0^{\tau_0} \Delta p \cdot S_k d\tau \right)^2, \text{ Вт} \quad (17)$$

$$\Delta m = \rho_{cm} \cdot S_k \cdot h_n, \text{ кг} \quad (18)$$

где Δp – значение импульса давления в канале, Па; S_k – площадь поперечного сечения канала, м²; τ – периодичность процесса образования импульсов давления, с; ρ_{cm} – плотность пара в паровом снаряде, кг/м³; h_n – размер снаряда, м; τ_0 – продолжительность импульса давления, с.

Значение максимального размера парового снаряда находилось из условия изотермичности его образования в канале:

$$h_n = L_0 \cdot \frac{\Delta p}{p_0}, \text{ м} \quad (19)$$

где L_0 – длина части канала, заполненной воздухом, м; p_0 – давление в канале при отсутствии снаряда, принимаемое равное давлению окружающей среды, Па.

При определении массы пароводяной смеси Δm_{cm} содержащейся в паровом снаряде, значение её плотности ρ_{cm} принималось одинаковое для всех случаев их образования в каналах. Это следовало из прямых измерений максимальных размеров снарядов h_n для отдельных режимов их образования (растворы глицерина 0,8 % и 4,0 %), что позволяло оценить значение ρ_{cm} .

Термомеханический КПД установки определялся в виде отношения располагаемой мощности импульсов давления к подводимой в процессе кипения жидкости тепловой мощности:

$$\eta = \frac{N}{Q} = \frac{\Delta p^2 \cdot S_k \cdot \tau_0^2}{h_n \cdot \rho_{cm} \cdot T \cdot Q}. \quad (20)$$

Таким образом, эффективность работы установки, принцип действия которой заключается в термомеханическом преобразовании энергии, определяется комплексом параметров, связанных с образованием паровых снарядов, численные значения которых находились из графиков изменения давления, аналогичных приведенным на рис. 17, и конструкционных параметров установки (внутреннего диаметра канала), плотности подводимого теплового потока, свойств рабочей жидкости.

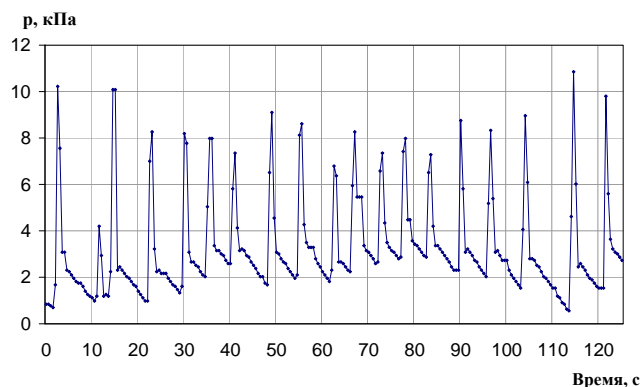


Рис. 17. Изменение давления внутри парового пузыря в процессе его роста в канале с малым диаметром ($q = 13 \text{ кВт/м}^2$, $d_k = 12,7 \text{ мм}$)

Это хорошо видно на рис. 18 и 19, где термомеханический КПД сложным образом зависит от внутреннего диаметра канала, объемного содержания глицерина (с %) в воде и плотности подводимого теплового потока.

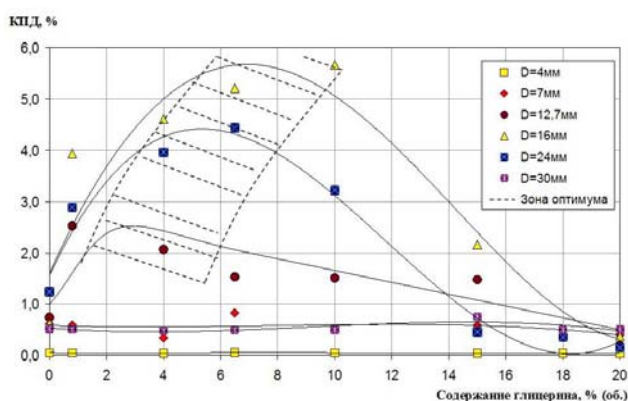


Рис. 18. Зависимость термомеханического КПД установки от внутреннего диаметра канала и объемного содержания глицерина в рабочей жидкости при $q = 13 \text{ Вт/м}^2$

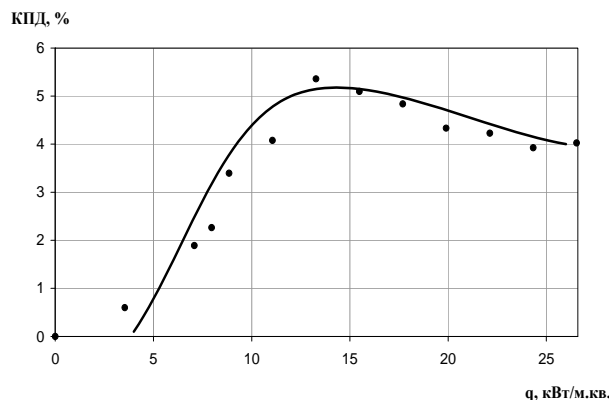


Рис. 19. Зависимость термомеханического КПД установки от уровня подводимого теплового потока для канала диаметром 16 мм и объемного содержания глицерина в рабочей жидкости 0,8 %

Среднеквадратичная погрешность при расчете термомеханического КПД равна 23 %.

В заключении сформулированы следующие основные выводы по работе:

1. Исследования показали, что наряду с классическими режимами парообразования жидкости, такими как пузырьковый, снарядный, эмульсионный, дисперсно-кольцевой, кольцевой, дисперсный, существует так называемый гиперснарядный режим парообразования, возникающий при отсутствии циркуляции теплоносителя.

2. Экспериментально определена область существования гиперснарядного режима парообразования: гиперснарядный режим возникает при кипении жидкости в каналах с диаметром от 7 до 24 мм при плотности теплового потока от 7 до 27 кВт/м² и концентрации глицерина в воде от 0,8 до 10 %, что позволяет прогнозировать величину теплопередачи и динамические нагрузки в энергетическом оборудовании с подобными параметрами.

3. Разработана физическая модель, описывающая процесс образования паровых снарядов при кипении жидкости в стесненных условиях.

4. Экспериментальные исследования теплотехнических характеристик термосифона показали снижение эффективности процессов переноса тепла в термосифоне в условиях существования гиперснарядного режима кипения теплоносителя: эффективность работы достигает лишь 85–90 % (в зонах оптимума) при плотности теплового потока 16–25 кВт/м²; степени заполнения рабочей жидкостью 10–30% и углах наклона к горизонту 30–90 градусов.

5. На основе полученных результатов работы даны практические рекомендации по повышению теплопередающей способности термосифонных теплообменных аппаратов: в исследованном диапазоне плотности теплового потока (от 7 до 27 кВт/м²) диаметр термосифонов исключаяющий возникновение гиперснарядного режима кипения должен быть не менее 20 мм, что соответствует переходу от вязкостно-гравитационного режима к режиму свободной конвекции.

6. Разработана методика оценки эффективности применения гиперснарядного режима кипения в термомеханической установке с узким вертикальным каналом.

7. Выполнены экспериментальные исследования характеристик паровых снарядов, образующихся в стесненных условиях, на основе которых установлено, что эффективность термомеханического преобразования, зависит от нескольких параметров: внутреннего диаметра вертикального канала, свойств рабочей жидкости, а также плотности подводимого теплового потока. Наибольшим значениям эффективности термомеханического преобразования 5–6% отвечают растворы глицерина в воде с концентрацией 6,0–10,0 % (об.), диаметр рабочего канала 12–16 мм и плотности теплового потока 10–20 кВт/м².

8. Проведенные исследования установок с термомеханическим преобразованием теплоты показали возможность использования гиперснарядного режима в процессах преобразования энергии.

9. Выполнены лабораторные и натурные исследования совместной работы термосифона с концентратором солнечной энергии, которые показали, что термомеханический метод преобразования можно использовать, в частности, для перекачки воды; а также для создания энергетических установок с источником тепла на базе неограниченного потенциала солнечной энергии либо низкопотенциального сбросного тепла.

Основные публикации по теме диссертации:

1. **Стариков Е.В. Возможность термомеханического преобразования солнечной энергии / Е.В. Стариков, В.М. Пахалуев, С.Е. Щеклеин // Альтернативная энергетика и экология. № 11. 2008. С. 67–71.**
2. **Стариков Е.В. Использование низкопотенциальных источников теплоты для питания автономных накопителей энергии / Е.В. Стариков, В.М. Пахалуев, С.Е. Щеклеин // Промышленная энергетика. № 6. 2009. С. 33–35.**
3. Исследование влияния некоторых параметров на режим парового снаряда в узких каналах / А.В. Буров, Е.В. Стариков, В.М. Пахалуев, С.Е. Щеклеин //

Научные труды XV международной научной конференции молодых ученых : сборник статей. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2009.

4. Немихин Ю.Е. Исследование многотрубного термосифонного теплообменника / Ю.Е. Немихин, Е.В. Стариков, С.Е. Щеклеин // Научные труды молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ XIII: сборник статей. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2007.
5. Стариков Е.В. Применение термосифона для отвода тепловой энергии из фокуса концентратора солнечной энергии / Е.В. Стариков [и др.] // Научные труды молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ XII: сборник статей. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2007.
6. Стариков Е.В. Проектирование парогенератора для работы в составе солнечных установок / Е.В. Стариков, С.Е. Щеклеин // Перспективные энергетические технологии. Экология. Экономика, безопасность и подготовка кадров : сборник научных трудов. Екатеринбург, 2006.
7. Стариков Е.В. Результаты натурных испытаний солнечного концентратора в режиме парогенерации / Е.В. Стариков, С.Е. Щеклеин // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых. 12 декабря 2007. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2006.
8. Стариков Е.В. Разработка конструкции солнечного концентратора для увеличения эксергетической эффективности процессов получения электрической и тепловой энергии / Е.В. Стариков // Экология 21 века: экотех-XXI : сборник докладов российско-британского семинара молодых ученых и студентов. Екатеринбург, 2007.
9. Пат. № 47496 Российская Федерация. Гелиотроп / Велькин В.И., Стариков Е.В., Щеклеин С.Е. Оpubл. 27.08.2005. 3 с.
10. Пат. № 51717 Российская Федерация. Гелиокухня / Велькин В.И., Смирнова П.В., Стариков Е.В., Щеклеин С.Е., Ухов А.Л. Оpubл. 27.02.2006. 3 с.
11. Пат. № 70694 Российская Федерация. Импульсный паровой двигатель / Петров А.С., Стариков Е.В., Щеклеин С.Е., Ухов А.Л., Четвертаков Д.С. Оpubл. 10.02.2008. 3 с.
12. Пат. № 71741 Российская Федерация. Усовершенствованный солнечный коллектор / Буров А.Л., Стариков Е.В., Ухов А.Л. Оpubл. 20.03.2008. 3 с.
13. Пат. № 77364 Российская Федерация. Упрощенный солнечный коллектор / Буров А.Л., Матвеев А.В., Стариков Е.В., Ухов А.Л. Оpubл. 20.10.2008. 3 с.
14. Пат. № 90139 Российская Федерация. Импульсный термоэлектрический двигатель / Буров А.Л., Стариков Е.В., Ухов А.Л. Оpubл. 27.12.2009. 3 с.

Подписано в печать 18.05.2010

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 1,0

Плоская печать

Тираж 120 экз.

Формат 60x84 1/16

Усл. печат. л. 1,4

Заказ

Ризография НИЧ УГТУ-УПИ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19